

# 施氮时期对玉米土壤硝态氮含量 变化及氮盈亏的影响

王启现,王 璞\*,申丽霞,王秀玲,张红芳,翟志席

(中国农业大学农学与生物技术学院,北京 100094)

**摘要:**在“郑单 958”(9 株/m<sup>2</sup>)组成的土-植系统,研究了不施氮、基施氮+10 叶展追氮、基施氮+吐丝期追氮和基施氮+乳熟期追氮共 4 个处理下 0~200 cm 的土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量在夏玉米生长期期间的变化和土壤氮素的表观盈亏量,结果表明:20cm 以上的土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量以大口期为界,20cm 以下的土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量以吐丝期为界前降后升。在 0~20cm 土层,与不施氮相比,施氮能增加土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量,而且吐丝期和乳熟至成熟阶段的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量在 10 叶展期和吐丝期各自追氮后均显著增加。在 20~40cm 土层,乳熟期的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量施氮后明显比不施氮高。在 80cm 以下土层,施氮后的土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量明显比不施氮高;追氮期相比,后一追氮处理在乳熟期和成熟期的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量均比前一追氮处理明显增加,其中成熟期基施氮+乳熟期追氮处理在 160~200cm 土层的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量比基施氮+吐丝期追氮处理(为 25.3mg N/kg(干土))高 16%。土壤氮素的表观盈余发生在吐丝期之前且 80%以上盈余量出现在大口期前,表观亏损出现在吐丝期以后且其亏损量在乳熟期前后各占一半。经玉米季后,本试验中不施氮处理出现表观盈余(为 56.3 kg N/hm<sup>2</sup>);施氮后表观盈余量增加,主要是施氮减少了吐丝以后土壤氮素的亏损量,其中推迟追氮时期能显著减少乳熟至成熟期间的亏损量。

**关键词:**玉米;氮肥;施氮时期;土壤硝态氮;土壤氮素表观盈亏

## Effect of nitrogen application time on dynamics of nitrate content and apparent nitrogen budget in the soil of summer maize fields

WANG Qi-Xian, WANG Pu\*, SHEN Li-Xia, WANG Xiu-Ling, ZHANG Hong-Fang, ZHAI Zhi-Xi  
(College of Agronomy and Biotechnology, China Agricultural University, Beijing 100094, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(8): 1582~1588.

**Abstract:** Applying N at high rate year by year in high maize yield production in China resulted in increasing basal soil N content and decreasing N fertilizer utilization efficiency. Moreover, it caused severe underground water pollution in many areas. Therefore, agricultural researchers are facing how to optimally use N fertilizer. There were a lot of researches on the relationship of N fertilizer application with crop growth and yield components. Due to high precipitation and temperature, soil N mineralization and fixation by microbes was active during summer maize growth season in China. Objective of this study was to determine the effect of N application time on dynamics of nitrate content and apparent nitrogen budget in the soil of summer maize fields.

A field experiment was carried out at the Wuqiao Experimental Station of China Agricultural University in north China in 2002. Four nitrogen application treatments were zero N, basal N plus dressing N at 10-unfolded-leaf stage, basal N plus dressing N at silking stage, and basal N plus dressing N at dough stage. Both rates of basal N and dressing N were 90 kg/hm<sup>2</sup>. The trial was completely randomized design with three replicates. Plot size was 6 m by 6 m.

The soil in the trial field was light salted loam in 0~130cm soil layers and loam in 130~200cm soil layers. Before sowing,

**基金项目:**国家“863”资助项目(2002AA2Z4021)

**收稿日期:**2003-05-27;**修订日期:**2004-03-15

**作者简介:**王启现(1976~),男,山东费县人,博士。主要从事食物营养与安全和农业可持续发展研究,E-mail:wangqx@peoplemail.com.cn

\* **通讯作者** Author for correspondence,E-mail:wangpu@cau.edu.cn

**Foundation item:** The National High Technology Research and Development Program of China (No. 2002AA6Z3201)

**Received date:**2003-05-27;**Accepted date:**2004-03-15

**Biography:** WANG Qi-Xian, Ph.D., mainly engaged in maize super-high yield production and its resource use efficiency.

the field was irrigated once and not ploughed. Maize cultivar Zhengdan 958, an erectophile type with high yield potential, was sown on June 10 and thinned to 9 plants/m<sup>2</sup> at 5-unfolded-leaf stage. P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and K<sub>2</sub>O were applied by dressing at the rates of 105 and 120 kg/hm<sup>2</sup>, respectively, on the day of sowing. An irrigation of 45 mm was done on August 3. From June to July, total precipitation was 110 mm and each rainfall was less than 20 mm. There was rainfall of 45mm on August 26. During whole growth season, total precipitation was 196.3 mm, which was one third of total precipitation in a normal year.

Soil samples were taken with a soil auger at five maize growth stages (i.e. sowing, female floret differentiation, silking, dough, and maturity). The samples were divided into different soil layers in 20cm increment from surface to 100cm depth, 100~130 cm, 130~160 cm, and 160~200 cm. Two sub-samples were taken per plot, mixed for each layer and then frozen immediately. Before analysis of mineral N including nitrate and ammonium, the soil samples were defrosted, mixed fully, and sifted with a 2-mm-sieve. Twenty grams of each sample was extracted with 100 ml of 1 mol/L KCl on a horizontal shaker for 1 hour and then filtered with quantative filter. Soil nitrate was determined with the Salicylic Acid Colorimetric Method and ammonium by the improved Ninhydrin Colorimetric Method.

Five plants were taken per plot at the same time of soil sampling. Plant samples were exposed at 105 C for half hour and then dried at 80 C. Total N content was analyzed with the Kjeldahl Digestion Method.

Based on reported results, the amount of mineralized N increased by fertilization approximately equals to the amount of fertilizer N fixed by microbes, the apparent budget of soil N (ABSN) could be calculated by following formula:

$$ABSN=TAON_{min}+RAN-TARN-ACUN$$

where TAON<sub>min</sub> the total amount of original mineral N, RAM=the rate of applied N, TARN=the total amount of residual mineral N, ACUN=the amount of crop uptake N.

The findings of the trial showed that in the 0~20 cm soil layer, the nitrate content was higher in the N-applied plots than in the zero N plots regardless of application time. The nitrate content at silking and from dough to maturity increased when N was dressed at the 10-unfolded leaf stage or at silking stage. In the 20~40 cm soil layer, the nitrate content at dough stage decreased in all N-applied treatments in comparison with the zero N treatment. In 80~200 cm soil layer, the nitrate content from N-applied time to maturity increased in comparison with zero N treatment. The nitrate content of the treatment of N dressed at dough stage was higher than that of the treatment of N dressed at silking stage or at the 10-unfolded leaf stage, and the treatment of N dressed at silking stage higher than the treatment of N dressed at the 10-unfolded leaf stage. At the maturity stage, the nitrate content of the treatment of basal N plus dressing N at dough stage in the 160~200 cm soil layer was higher than that of the treatment of basal N plus dressing N at silking stage. In this trial, the ABSN of the zero N treatment was 56.3 kg/ha. The ABSN was higher in the N-applied plots than in zero N plots. Soil N surplus (SNS) appeared before silking stage and the 80% of SNS before female floret differentiation stage. After silking stage, soil N deficit (SND) appeared and approximately half of SNS before dough stage. In comparison with zero N plots, the SND from silking stage to maturity stage decreased in the N-applied plots. The SND from dough stage to maturity was lower in the plots of N dressed at dough stage than in the plots of N dressed at silking stage or at the 10-unfolded leaf stage, and the plots of N dressed at silking stage lower than the plots of N dressed at the 10-unfolded leaf stage.

**Key words:**maize(*Zea mays* L.); nitrogen fertilizer; N application time; soil nitrate content; apparent budget of soil N  
文章编号:1000-0933(2004)08-1582-07 中图分类号:S512.106 文献标识码:A

在我国粮食高产和超高产研究和生产中,常年大量施用氮肥造成土壤基础肥力显著提高,夏玉米季氮肥增产效应变小、氮肥利用率下降已成共识<sup>[1]</sup>。但在高肥力地块仅依靠土壤供氮,作物产量潜力发挥又受到限制<sup>[2]</sup>,且不持续。此外,存留在土壤中的大量残留硝态氮在玉米季因降雨被淋洗到地下水中<sup>[3]</sup>,在北京地区因过量施氮夏玉米季也造成明显的氮素淋溶损失<sup>[4]</sup>,造成土壤环境隐患。夏玉米期氮肥在作物-土壤体系中的回收率显著低于冬小麦季,而损失率显著高于冬小麦季<sup>[5]</sup>;玉米对肥料氮的利用率较低<sup>[6]</sup>。因此,有效利用土壤本身供氮变化和玉米需氮规律,合理施用氮肥具有重要意义。周顺利等<sup>[7]</sup>研究了施氮量下在播前、吐丝和收后夏玉米季土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 的含量,认为氮肥提高了土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量和土壤氮素表观盈亏量,且提高程度与用量呈正相关。本试验在田间条件下对夏玉米季不同施氮时期,2m 土体中土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量动态进行了研究,并对土壤氮素表观盈亏平衡进行了估算,以期为指导科学施肥、提高氮肥利用率提供理论依据。

试验于 2002 年在河北省吴桥实验站进行。试验地土质为轻壤,属盐化潮土类型,有机质含量 11.0 mg/g,全氮(N)0.7 mg/g,碱解氮(N)44.6 mg/kg,速效磷(P)15.3 mg/kg,速效钾(K)73.4 mg/kg,地力中等偏下,pH 8.21。

1.1 试验材料与设计

以紧凑型玉米品种郑单 958 为材料,设不施氮、基施氮+10 叶展追氮、基施氮+吐丝期追氮和基施氮+乳熟期追氮共 4 个处理,单因素随机设计,3 次重复。氮肥用尿素,施用时期按试验设计进行(每次施氮均为 90 kg/hm<sup>2</sup>)。磷肥用三料磷(以 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 计,105 kg/hm<sup>2</sup>),钾肥用硫酸钾(以 K<sub>2</sub>O 计,120 kg/hm<sup>2</sup>),均在播种前全部一次性基施。小区面积为 36 m<sup>2</sup>,每小区等行距种植 10 行,行距 60 cm,植株密度为 9 株/m<sup>2</sup>,6 月 10 日播种,6 月 16 日出苗,8 月 8 日吐丝,9 月 29 日收获。从播种前取土(6 月 9 日)至收获后取土(9 月 30 日)期间降雨为 196.3 mm(降雨分布见表 1),其中 8 月 3 日浇水 45 mm;相应期间  $\sum \geq 0^{\circ}\text{C}$  的积温是 2782.8℃(气温情况见表 1)。

表 1 2002 年夏玉米田取土期间的气温和降雨情况

Table 1 Precipitation and air temperature during soil samples harvested from maize field in 2002						
取样阶段 Phase of sample harvested		播种前~大喇叭口期 Sowing~♀ floret	大喇叭口期~吐丝期 ♀ floret~silking	吐丝期~乳熟期 Silking-dough	乳熟期~成熟期 Dough~maturity	合计 Sum
降雨 Precipitation	降雨量 Amount(mm)	110.3	11.3	51.7	23.0	196.3
	占全期比例 Percent(%)	56.2	5.8	26.3	11.7	100.0
气温 Air temperature	气温 Amount( $\sum \geq 0^{\circ}\text{C}$ )	1357.7	418.2	571.9	435.0	2782.8
	占全期比例 Percent(%)	48	15.0	20.6	15.6	100.0

1.2 测定项目与方法

在夏玉米生长季,试验于播种前、大口期、吐丝期、乳熟期和成熟期共采集土壤样品 5 次。先沿小区对角线在植株具代表性的行间选样点,用土钻在样点处分 8 层(0~20cm,20~40cm,40~60cm,60~80cm,80~100cm,100~130cm,130~160cm,160~200cm) 采取土壤鲜样,每小区 2 个样点,3 次重复,按采样点分层装入塑料袋,迅速于冰柜中保存。鲜土样处理如下:样品解冻后,将袋中土样充分混匀,称取 20 g 鲜土于 180 mL 塑料瓶中,加入 1 mol/L 的 KCL 溶液 100 mL,震荡 1 h,用定量滤纸过滤到胶卷盒中,过滤液需立刻冰冻保存或测定;同时,测定土壤含水量。将过滤液解冻后,用水杨酸法<sup>[8]</sup>测定 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量,在 410 nm 比色;同时,用改良茚三酮法<sup>[9]</sup>测定 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量,在 580 nm 下比色,Nmin 为 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 与 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 之和。另外,在采集土样同期取植物样品,每小区考察 5 株玉米,在 105℃杀青 0.5 h 后于 80℃下烘干至恒重,称重后粉碎,用半微量凯式定氮法测定植株全 N 含量。

朱兆良<sup>[10]</sup>等综合有关结果后认为,因施入化肥氮所增加的土壤氮素的矿化量(N<sub>矿化</sub>)和被土壤生物固定的化肥氮(N<sub>固定</sub>)在数量上基本相当。据此,土壤氮素表观盈亏量按下式计算<sup>[7, 11]</sup>:ABS<sub>N</sub>=(TAON<sub>min</sub>+RAN+AMN)-(TARN+ACUN+AFN)=(TAON<sub>min</sub>+RAN)-(TARN+ACUN),其中 ABS<sub>N</sub> 是表观盈亏量,TAON<sub>min</sub> 是土壤 N<sub>min</sub> 起始总量,RAN 为施氮量,AMN 为 N<sub>矿化</sub>,TARN 为土壤 N<sub>min</sub> 残留总量,ACUN 为作物吸氮量,AFN 为 N<sub>固定</sub>。

2 结果与分析

2.1 施氮期对玉米季 0~80 cm 土层 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量变化的影响 从图 1 可知,0~20cm 的土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量在大口期以前下降,此后增加,施氮增加了该层的土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量且施氮期的影响明显。20~80cm 各层的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量在吐丝期以前下降,吐丝期以后上升,受施氮时期影响各层的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量变化存在差异。在 0~20 cm 土层,与不施氮相比,基施氮(6 月 17 日)的土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量增加,其在大口期的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量比不施氮(为 9.31 mg N/kg(干土))高 15.4%;追施氮后引起了 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量的变化。因 10 叶展氮(7 月 25 日)施后 7d 进入大口期,基施氮+10 叶展追氮处理(以下称 10 叶处理)的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量显著提高(为其它处理的 2 倍)。大口期以后,不施氮处理的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量一直增加平缓;10 叶处理的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量下降持续到乳熟前,乳熟后明显增加;因吐丝氮(8 月 13 日)提前 3d 施入,基施氮+吐丝期追氮处理(以下称吐丝处理)的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量在整个灌浆阶段尤其在乳熟以后迅速增加;因基施氮影响,基施氮+乳熟氮处理(以下称乳熟处理)的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量在乳熟前增幅虽与不施氮一样但其含量较高,乳熟氮(8 月 29 日)施入后该层的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量下降到不施氮水平。

在 20~40 cm 土层,与不施氮相比,施氮降低了灌浆阶段该层的土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量。基施氮后 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量在大口期之前比不施氮处理高,在大口期以后低于不施氮处理且在吐丝至乳熟阶段变化平稳(基本稳定在 7~8 mg N/kg(干土))。10 叶处理的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量自 10 叶展氮施入至乳熟期间基本稳定在 13mg N/kg(干土),乳熟以后急剧增加。因吐丝氮影响,吐丝处理的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量在乳熟阶段迅速增加到 19.6 mg N/kg(干土)并在乳熟以后基本稳定。因乳熟氮影响,乳熟处理的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量在乳熟以后显著增加并超过吐丝处理。

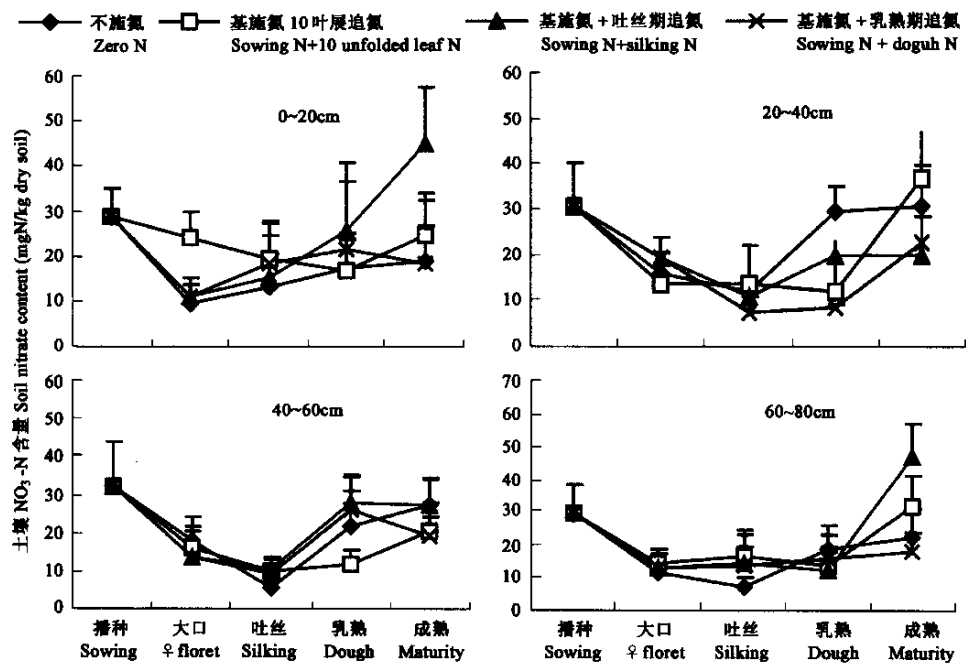


图1 施氮期对0~80cm 土层 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量的影响

Fig.1 Soil nitrate content at different layers affected by Nf application time during maize season

在 40~60 cm 土层,土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量在吐丝期以前受施氮的影响不明显,在吐丝以后受施氮的影响较大。在灌浆阶段,不施氮处理的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量在吐丝至乳熟阶段增加明显但此后变化平缓;10 叶处理的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量在吐丝至乳熟阶段波动较小,乳熟以后明显下降;吐丝处理的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量变化与不施氮处理相同,但受吐丝氮影响在吐丝至乳熟阶段其含量较高且乳熟至成熟期间基本稳定在 27 mg N/kg(干土);乳熟处理的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量在吐丝至乳熟阶段上升但在乳熟以后明显下降。

在 60~80 cm 土层,不施氮处理的土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量在吐丝以前下降,吐丝后上升,施氮增加了该层的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量并改变了其变化。在大口至乳熟阶段,基施氮后 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量显著增加并稳定在 15 mg N/kg(干土),推迟施氮期能增加 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量但不明显。在乳熟至成熟阶段,除乳熟处理的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量持续较低而不施氮处理的略有增加外,吐丝处理和 10 叶处理的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量都迅速增加且前者增幅明显大于后者。

2.2 施氮期对玉米季 80~200 cm 土层 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量变化的影响

如图 2 所示,在 80~200cm 各层的土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量在吐丝以前下降,吐丝以后上升,施氮增加了各土层的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量但施氮时期的影响明显。

在 80~100 cm 土层,在播种至吐丝阶段,除因受吐丝氮影响吐丝处理在吐丝期的含量显著增加外,该层的土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量均下降。施氮后 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量比不施氮高,但施氮期影响不明显。在吐丝至乳熟阶段,不施氮处理和 10 叶处理的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量增幅一致,吐丝处理的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量稳定在吐丝时(18.2 mg N/kg(干土))的水平,而受乳熟氮影响乳熟处理在乳熟期的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量显著高于其它处理。在乳熟至成熟阶段,不施氮处理的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量下降,施氮的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量不仅显著增加而且呈上升趋势,与前一施氮期相比,施氮期推迟的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量增幅加大;在成熟期 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量依次是:乳熟处理>吐丝处理>10 叶处理>不施氮处理,其中乳熟处理的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 显著高于其它处理。

在 100~130 cm 土层,不施氮处理的土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量在大口以前下降,在大口至乳熟阶段缓慢缓慢上升,并在乳熟至成熟阶段稳定在 16 mg N/kg(干土)。而施氮后整个玉米季的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量不仅显著增加而且动态发生改变,如,施氮后 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量在吐丝以前下降,吐丝后上升。在大口期以前,基施氮的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量比不施氮高,其中在大口期基施氮的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量比不施氮(13.3 mg N/kg(干土))显著提高 60.8%。在大口至吐丝阶段,与其它处理相比,10 叶展氮追施后 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量的降幅进一步减小。10 叶处理的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量在吐丝至乳熟阶段上升而在乳熟至成熟阶段下降;吐丝处理和乳熟处理的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量在吐丝至成熟阶段持续上升,但两者比较,前者在吐丝至乳熟阶段而后者在乳熟至成熟阶段的增幅较大,在成熟期该层的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量依次是:吐丝处理>乳熟处理>10 叶处理>不施氮处理。

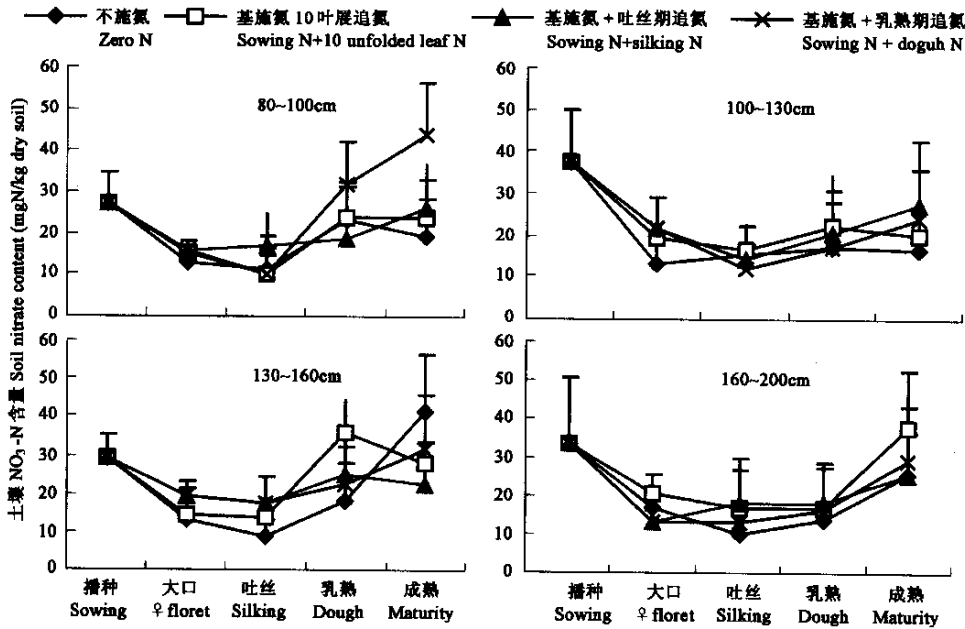


图 2 施氮期对 80~200cm 土层 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量的影响

Fig. 2 Soil nitrate content at different layers affected by Nf application time during maize season

在 130~160 cm 土层,施氮后该层的土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量显著增加。在吐丝以前,NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量下降,施氮的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量一直比不施氮高,所以,基施氮特别是 10 叶展追氮施后 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量的降幅明显小于不施氮。与不施氮相比,施氮的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量在吐丝至乳熟阶段增加但在乳熟至成熟阶段降低,其中 10 叶处理和吐丝处理的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量在吐丝至乳熟阶段均上升、乳熟至成熟阶段均下降,且前者幅度显著大于后者;而不施氮处理和乳熟处理的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量在灌浆阶段持续增加。

在 160~200 cm 土层,大口期以前,基施氮的土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量比不施氮低,但受 10 叶展氮影响 10 叶处理的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量比不施氮处理高。大口期以后,施氮后 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量显著提高且施氮期的影响明显。在大口至吐丝阶段,10 叶处理的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量继续下降、受吐丝氮影响吐丝处理的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量增加,而乳熟处理的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量则稳定在 13 mg N/kg(干土);在吐丝至乳熟阶段,10 叶处理和吐丝处理的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量分别稳定在 17 mg N/kg(干土)和 18 mg N/kg(干土),而受乳熟氮影响乳熟处理的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量明显增加;在乳熟至成熟阶段,延迟施氮期能明显增加 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量,其中乳熟处理在成熟时的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量比吐丝处理高 16%。

2.3 不同施氮期下玉米季土壤氮素表观盈亏估算

对农田土壤氮素收支(玉米季主要是施入化肥氮和带走作物吸收氮)加以考虑,估算了土壤氮素的表观盈亏量(表 2)。在本试验条件下,经过夏玉米生长季后,不施氮处理的土壤氮素出现了表观盈余(为 56.3kg N/hm<sup>2</sup>);施氮后土壤氮素的表观盈余量显著增加,而且推迟施氮期能明显增加土壤氮素的表观盈余量,其中乳熟处理的表观盈余量多达 223.4 kg N/hm<sup>2</sup>(为不施氮处理的 4 倍),10 叶处理和吐丝处理的表观盈余量均比乳熟处理低 36%且二者差别不明显。

表 2 不同施氮期下玉米生长季土壤氮素表观盈亏量

Table 2 Apparent budget of soil nitrogen affected by Nf application time during maize season

处理 Treatments	播种~吐丝 Sowing~silking				合计 Sum	吐丝~成熟 Silking~maturity				合计 Sum	播种~成熟 Sowing~ maturity
	播种~大口		大口~吐丝			吐丝~乳熟		乳熟~成熟			
	Sowing~♀ floret		♀ floret~silking			Silking~milking		Milking~maturity			
	(kgN/hm <sup>2</sup> )	(%)	(kgN/hm <sup>2</sup> )	(%)		(kgN/hm <sup>2</sup> )	(%)	(kgN/hm <sup>2</sup> )	(%)		
不施氮 Zero N	480.85	81.39	109.95	18.61	590.80	-337.44	63.13	-197.07	36.87	-534.52	56.28
基施氮+10 叶展追氮 Basal N+10-unfolded leaf N	536.31	87.34	77.72	12.66	614.03	-232.21	49.12	-240.53	50.88	-472.75	141.28
基施氮+吐丝期追氮 Basal N+silking N	503.63	85.05	88.51	14.95	592.14	-257.33	57.16	192.84	42.84	-450.17	141.97
基施氮+乳熟期追氮 Basal N+milking N	503.74	90.36	53.72	9.64	557.46	-168.84	50.55	-165.17	49.45	-334.01	223.45



在夏玉米生长季,土壤氮素的表现盈余(盈余量为正值)出现在吐丝以前,但盈余量的80%以上发生在大口期以前;吐丝以后出现土壤氮素的表现亏损(盈余量为负值),且亏损量在乳熟前后各近一半。不同生育阶段的盈亏量受施氮时期的明显影响。在大口期以前,施氮后土壤氮素的盈余量占吐丝前净盈余量的比例由不施氮的81%提高到85%以上,其中,基施氮的表现盈余量比不施氮增加4.7%,10叶展氮施入后土壤氮素的盈余量进一步增加(比不施氮高11.5%)。在大口至吐丝阶段,施氮的土壤氮素盈余量比不施氮低,除受吐丝氮影响吐丝处理的盈余量和10叶处理相近(二者分别为不施氮处理的80.5%和70.7%)外,乳熟处理的盈余量仅为不施氮处理的1/2。在吐丝至乳熟阶段,施氮后土壤氮素亏损量比不施氮低,该阶段的亏损量占灌浆阶段净亏损量的比例由不施氮的63%下降到57%以下,其中,10叶处理的亏损量和吐丝处理相近(分别比不施氮处理低31.2%和23.7%),受乳熟氮影响乳熟处理在该阶段的亏损量最少。在乳熟至成熟阶段,施氮降低了土壤氮素的亏损量,且施氮期推迟,土壤氮素亏损量减少,尤其是吐丝处理和乳熟处理的亏损量分别比不施氮处理低2.2%和16.2%,10叶处理的亏损量比不施氮高22.1%。

### 3 讨论

土壤 $\text{NO}_3^-$ -N含量在夏玉米季的变化因土层深度而异,0~20cm的 $\text{NO}_3^-$ -N含量在大口以前下降、大口以后上升,20~200cm各层的 $\text{NO}_3^-$ -N含量均在吐丝以前下降、吐丝以后上升。与此不同,Dou Z等<sup>[12]</sup>在美国宾夕法尼亚洲研究结果是:0~25cm和25~45cm两层的土壤 $\text{NO}_3^-$ -N含量均在玉米播种后4周上升到最大值,此后下降。

施氮能增加土壤 $\text{NO}_3^-$ -N含量,特别是增加20cm以上和80cm以下土层的 $\text{NO}_3^-$ -N含量。周顺利等<sup>[7]</sup>比较了4个施氮量(0, 112.5, 225, 337.5和450 kg N/hm<sup>2</sup>)处理在夏玉米季的土壤 $\text{NO}_3^-$ -N含量,认为高施氮量下 $\text{NO}_3^-$ -N含量高。Liang等<sup>[13]</sup>也认为与常规氮量(170kgN/hm<sup>2</sup>)相比,高施氮量(400kg N/hm<sup>2</sup>)的土壤 $\text{NO}_3^-$ -N含量在整个玉米季都显著提高。关于 $\text{NO}_3^-$ -N的垂直分布,周顺利等<sup>[7]</sup>认为在0~100cm土壤剖面上 $\text{NO}_3^-$ -N在夏玉米一生的分布均为中间土层含量低、上层和下层含量高,一般是表层最高,但因降雨或灌溉在高肥处理中有下层高于表层现象。不同土层的 $\text{NO}_3^-$ -N含量受施氮期的影响不同,即施氮时期也能改变土壤 $\text{NO}_3^-$ -N的垂直分布。基施氮的0~40cm土壤 $\text{NO}_3^-$ -N含量在播种至大口阶段比不施氮高,10叶处理的 $\text{NO}_3^-$ -N含量自10叶展氮施入至吐丝在0~20cm土层增加迅速、在20~40cm土壤土层变化平稳,吐丝处理的0~40cm $\text{NO}_3^-$ -N含量在吐丝氮施入至乳熟阶段增加,而乳熟处理的 $\text{NO}_3^-$ -N含量自乳熟氮施后在0~20cm土层下降、在20~40cm土层增加。推迟施氮期能明显增加灌浆阶段特别是乳熟以后80cm以下土层的 $\text{NO}_3^-$ -N含量,其中在成熟期基施氮+乳熟期追氮处理160~200cm的 $\text{NO}_3^-$ -N含量比基施氮+吐丝期追氮处理(为25.3 mg N/kg(干土))高16%。深层土壤的 $\text{NO}_3^-$ -N含量增加,一方面可以引导玉米根系下扎,另一方面这些 $\text{NO}_3^-$ -N在灌溉或大量降雨后可能淋洗出根区造成资源浪费和地下水污染。研究表明,播前施氮157kg/hm<sup>2</sup>增加了玉米季土壤 $\text{NO}_3^-$ -N残留量<sup>[14]</sup>,而且推迟施肥期能增加土壤残留氮量<sup>[15]</sup>。一种观点认为,最好的氮肥管理方案是减少作物生长季末土壤 $\text{NO}_3^-$ -N残留量<sup>[3]</sup>。因此,如何确定最佳施氮期,从而经济高效利用氮肥,需要深入研究。

本试验的土地肥力较高,且玉米季降雨量仅为常年的1/3,经玉米季后不施氮处理的土壤氮素出现表现盈余;施氮玉米季土壤氮素的表现盈余量明显增加。而在夏玉米季降雨较多的年份<sup>[7]</sup>,无氮甚至低氮处理经玉米季后都出现土壤氮素的亏缺。土壤氮素表现盈亏具有明显的阶段性,夏玉米季所有处理都在吐丝之前出现表现盈余,且盈余量的80%以上出现在大口期以前;吐丝以后出现表现亏损,且亏损量在乳熟前后各占一半。冬小麦季的研究结果<sup>[11]</sup>与之相似,扬花以前既使不施氮也出现土壤氮素的表现盈余,扬花以后各施氮量的土壤氮素均出现表现亏缺。本研究表明,与不施氮相比,施氮后增加土壤氮素盈余量,主要表现在:灌浆阶段的亏损量均减少,特别是在乳熟至成熟阶段,推迟施氮期能显著减少土壤氮素的亏损量。相关研究<sup>[7]</sup>表明,夏玉米季土壤氮素的表现盈余主要出现两个生育阶段(播种至9叶期和9叶期至吐丝,其中9叶展至吐丝阶段低氮和无氮处理出现土壤氮素亏缺,但施氮量提高后出现盈余),在吐丝至收获阶段则出现表现亏缺。可见,随着施氮量增加,玉米一生中土壤氮素的表现盈余量明显增大<sup>[7]</sup>。土壤氮素转化需微生物参与,不仅取决于土壤有机氮含量的多少,也受温度和水分条件的影响<sup>[10]</sup>。因此,玉米季土壤 $\text{NO}_3^-$ -N供应情况,应根据地力情况,分类进行多年度的深入研究,为氮肥合理施用提供科学依据。

### 4 小结

(1)玉米季 $\text{NO}_3^-$ -N含量变化因土层而异。0~20cm的 $\text{NO}_3^-$ -N含量在大口以前下降、大口以后上升,20~200cm的 $\text{NO}_3^-$ -N含量在吐丝以前下降、吐丝以后上升。

(2)施氮增加 $\text{NO}_3^-$ -N含量,特别是增加20cm以上和80cm以下土层的 $\text{NO}_3^-$ -N含量且施氮时期影响明显。基施氮0~40cm的 $\text{NO}_3^-$ -N含量在播种至大口阶段比不施氮高,10叶处理的 $\text{NO}_3^-$ -N含量自10叶展氮施入至吐丝阶段在0~20cm土层增加迅速、在20~40cm变化平稳,吐丝处理0~40cm的 $\text{NO}_3^-$ -N含量在吐丝氮施入至乳熟阶段增加,乳熟处理的 $\text{NO}_3^-$ -N含量自乳熟氮施后在0~20cm土层下降、在20~40cm增加。推迟施氮期能明显增加灌浆阶段特别是乳熟以后80cm以下土层的 $\text{NO}_3^-$ -N含量,其中成熟期基施氮+乳熟期追氮处理160~200cm的 $\text{NO}_3^-$ -N含量比基施氮+吐丝期追氮处理(为25.3 mg N/kg<干土>)

16%。

(3)在本试验中,玉米季所有处理的土壤氮素在吐丝之前均出现表观盈余,且盈余量的 80%以上出现在大口以前;吐丝后出现表观亏损,且亏损量在乳熟前后各占一半。经玉米季后不施氮的土壤氮素出现表观盈余,施氮后表观盈余量比不施氮增加,表现为播种至大口期间的盈余量增加、大口至吐丝期间的盈余量和灌浆阶段的亏损量均减少,特别是在乳熟至成熟阶段,推迟施氮期能减少土壤氮素的亏损量。

## References:

- [1] Zhang F S, Mi G H, Liu J A. Advances in the genetic improvement of nitrogen efficiency in maize. *Journal of Agricultural Biotechnology*, 1997, **5**(2): 112~117.
- [2] Zebarth B J, Paul J W, Younie M, *et al.* Fertilizer nitrogen recommendations for silage corn in high-fertility environment based on pre-sidedress soil nitrate test. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2001, **32**(17,18): 2721~2739.
- [3] Karlen D L, Kramer L A, Logsdon S D. Field-scale nitrogen balances associated with long-term continuous corn production. *Agronomy Journal*, 1998, **9**(5): 644~650.
- [4] Yuan F M, Chen Z M, Yao Z H, *et al.*  $\text{NO}_3^-$ -N transformation accumulation and leaching loss in surface layer of chao-soil in Beijing. *Acta Pedologica Sinica*, 1995, **32**(4): 388~399.
- [5] Ju X T. Transformation and fate of soil-fertilizer nitrogen in winter wheat / summer maize rotation system. *Beijing: China Agricultural University, Ph. D dissertation*, 2000. 55~78.
- [6] Magdoff F. Understanding the pre-sidedress nitrate test for corn. *Journal of Production Agriculture*, 1991, **4**: 297~305.
- [7] Zhou S L, Zhang F S, Wang X R. The Spatio-temporal Variations of Soil  $\text{NO}_3^-$ -N and Apparent Budget of Soil Nitrogen II. Summer Maize. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, **22**(1): 48~53.
- [8] Zou Q. *Experimental instructing book of plant physiology*. Beijing: China Agriculture Press, 2000. 54~55.
- [9] Shanghai institute of plant physiology (eds.). *Experimental guidelines of modern plant physiology*. Beijing: Science Press, 1999. 138~139.
- [10] Zhu Z L. On some aspects in soil nitrogen research. *Progress in Soil Science*, 1989, **2**: 1~9.
- [11] Zhou S L, Zhang F S, Wang X R. Studies on the spatial-temporal variation of soil  $\text{NO}_3^-$ -N and apparent budget of soil nitrogen: I. Winter wheat. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, **21**(11): 1782~1789.
- [12] Dou Z, Fox R H, Toth J D. Seasonal soil nitrate dynamics in corn as affected by tillage and nitrogen source. *Soil Science Society of America Journal*, 1995, **59**(3): 858~864.
- [13] Liang B C, Remillard M, MacKenzie A F. Influence of fertilizer, irrigation, and non-growing season precipitation on soil nitrate-nitrogen under corn. *Journal of Environmental Quality*, 1991, **20**(1): 123~128.
- [14] Lory J A, Randall G W, Russelle M P. Crop sequence effects on response of corn and soil inorganic nitrogen to fertilizer and manure nitrogen. *Agronomy Journal*, 1995, **87**(5): 876~883.
- [15] Herron G M, Dreier A F, Flowerday A F, *et al.* Residual mineral N accumulation in soil and its utilization by irrigated corn (*Zea mays* L.). *Agronomy Journal*, 1971, **63**(2): 322~327.

## 参考文献:

- [1] 张福锁, 米国华, 刘建安. 玉米氮效率遗传改良及其应用. 农业生物技术学报, 1997, **5**(2): 112~117.
- [4] 袁锋明, 陈子明, 姚造华, 等. 北京地区潮土表层中  $\text{NO}_3^-$ -N 的转化积累及其淋洗损失. 土壤学报, 1995, **32**(4): 388~399.
- [5] 巨晓棠. 冬小麦/夏玉米轮作体系中土壤、肥料氮的转化及去向. 北京: 中国农业大学博士学位论文, 2000. 55~78.
- [7] 周顺利, 张福锁, 王兴仁. 土壤硝态氮时空变异与土壤氮素表观盈亏 II. 夏玉米. 生态学报, 2002, **22**(1): 48~53.
- [8] 邹琦主编. 植物生理学实验指导. 北京: 中国农业出版社, 2000. 54~55.
- [9] 中科院上海植物生理研究所编. 现代植物生理学实验指南. 北京: 科学出版社, 1999. 138~139.
- [10] 朱兆良. 关于土壤氮素研究中的几个问题. 土壤学进展, 1989, **2**: 1~9.
- [11] 周顺利, 张福锁, 王兴仁. 土壤硝态氮时空变异与土壤氮素表观盈亏研究 I. 冬小麦. 生态学报, 2001, **21**(11): 1782~1789.